

页岩储层岩芯核磁共振响应特征实验研究

孙军昌¹, 陈静平², 杨正明^{1,3}, 刘学伟³, 刘远俊⁴

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油渤海钻探工程公司第二录井分公司作业一部, 河北廊坊 065007
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
4. 长江大学工程技术学院, 湖北荆州 434023

摘要 系统研究致密页岩储层核磁共振响应特征对于将核磁共振技术应用于该类油气资源开发具有重要的基础指导作用。综合使用核磁共振、气水离心等实验技术研究了页岩核磁共振 T_2 谱响应特征、核磁孔隙度、可动流体 T_2 截止值及岩石比表面分布等储层特征。研究表明, 页岩 T_2 谱可以分为 3 种类型, 即单峰 T_2 谱、含有孤立右峰的双峰 T_2 谱及左、右峰连续分布的双峰态 T_2 谱, 页岩绝大多数 T_2 弛豫时间小于 10ms, 储层中裂缝孔隙约占总孔隙空间的 9.16%。基于核磁共振 T_2 谱计算的页岩比表面主要分布在 $3.59\text{--}80.51\mu\text{m}^{-1}$ 。页岩核磁孔隙度普遍小于水测孔隙度, 平均误差约为 22.33%, 其与黏土孔隙、裂缝孔隙发育等因素有关。结合气水离心实验结果, 计算得到页岩储层核磁共振可动流体 T_2 截止值分布在 $3.87\text{--}16.68\text{ms}$, 平均值为 8.29ms, 储层基质岩石游离气饱和度平均值约为 9.72%。

关键词 页岩气储层; 核磁共振; 离心实验; 可动流体 T_2 截止值; 游离气饱和度

中图分类号 TE311

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.14.002

Experimental Study of the NMR Characteristics of Shale Reservoir Rock

SUN Junchang¹, CHEN Jingping², YANG Zhengming^{1,3}, LIU Xuewei³, LIU Yuanjun⁴

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. The First Operation Department, The Second Mud Logging Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development of CNPC, Langfang 065007, Hebei Province, China
4. Engineering & Technology College, Yangtze University Jingzhou 434023, Hubei Province, China

Abstract It is very important to systematically study the NMR characteristics of the shale core sample before the NMR logging technology can be used in the development of the shale gas reservoir. This paper studies the NMR characteristics, the NMR porosity, the movable fluid $T_{2\text{cutoff}}$ and other NMR properties of the shale rock sample. The experimental results demonstrate that the shale T_2 spectrum can be divided into three types, the single peak T_2 spectrum, the two peak T_2 spectrum containing one isolated right peak and the two peak T_2 spectrum containing continuous left and right peaks. The T_2 relaxation of the shale is mostly less than 10ms. The fracture porosity is only about 9.16% of the total pore space. The surface area per unit volume of the shale gas reservoir ranges mainly from 3.59 to $80.51\mu\text{m}^{-1}$. The shale NMR porosity is generally less than its conventional porosity. The average error is about 22.33%. The movable fluid $T_{2\text{cutoff}}$ value is in the range from 3.87 to 16.68ms and its average value is 8.29ms. The free gas saturation of the shale gas reservoir obtained from the centrifugal experiment is about 9.72%.

Keywords shale gas reservoir; nuclear magnetic resonance; centrifugal experiment; movable fluid $T_{2\text{cutoff}}$; free gas saturation

收稿日期: 2011-04-03; 修回日期: 2011-05-07

基金项目: 国家油气重大专项 (2011ZX05013-006)

作者简介: 孙军昌, 博士研究生, 研究方向为油气渗流力学, 电子信箱: jjsun1983@yahoo.com.cn

0 引言

页岩气是指以游离、吸附和溶解状态赋存于暗色泥页岩中的天然气,是典型的“自生自储”系统^[1]。页岩气是一种典型的非常规天然气,由于该类储层岩性致密,孔隙度和渗透率极低,20世纪70年代曾被归入非经济可采资源^[2]。随着油气开发技术的进步和人类对油气资源需求的增长,页岩气因其巨大的资源潜力受到关注^[1-3]。目前,美国在页岩气资源开发已取得了初步成功,但中国还处于起步阶段,研究主要集中在页岩气有利区评价、储层特征、含气饱和度测定等方面^[1-3]。

与常规砂岩储层相比,页岩气储层岩性极为致密,储层储集空间既包括亚微米、纳米级的基质孔隙,同时也部分发育有孔径相对较大的裂缝^[1-3]。基于页岩储层的特殊性,使用常规实验测试方法进行页岩物性分析时面临一定的问题,实验效率较低或实验结果误差较大。核磁共振技术是近年来逐渐在石油工业领域广泛使用的无损检测技术之一,由于饱和含氢流体岩石进行实验测试时核磁仪器仅对孔隙流体有响应,岩石骨架矿物对核磁信号的影响很小^[4-5]。因此,进行岩石核磁共振测量不仅可以得到孔隙度、渗透率等常规物性参数,而且与气水离心、多相渗流实验相结合还可以获得可动流体饱和度、残余油饱和度等参数^[5],将室内岩芯核磁共振实验结果用于地层核磁测井信息刻度与校正,还可以获得实际地层原位信息^[5]。目前,核磁共振岩芯实验、录井及测井技术在砂岩和碳酸盐岩储层中应用较多^[4-5],但在页岩气藏开发中的应用较少,相关研究仅处于探索阶段。

本文使用低磁场核磁共振岩样分析仪,系统研究了页岩核磁共振 T_2 谱响应特征、页岩核磁孔隙度与常规孔隙度的差异,并结合离心实验结果标定了页岩可动流体 T_2 截止值及基质储层游离气饱和度大小。实验结果表明,页岩核磁共振 T_2 谱与砂岩具有明显的差别,页岩可动流体 T_2 截止值、基质游离气饱和度也明显小于砂岩储层。研究结果对于核磁共振技术在页岩气开发中的应用具有重要的基础指导作用。

1 核磁共振原理简介

顾名思义,核磁共振是指原子核与磁场之间的相互作用^[4-5]。根据核磁共振基本原理,多孔介质中流体的弛豫特征可以用下述数学公式进行描述^[5]:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2b}} + \frac{1}{T_{2D}} + \frac{1}{T_{2s}} \quad (1)$$

式中, $1/T_2$ 为孔隙流体总的弛豫速率(T_2 称为横向弛豫时间), ms^{-1} ; T_{2b} 、 T_{2D} 和 T_{2s} 分别为孔隙流体的体弛豫、扩散弛豫和表面弛豫时间。

由于孔隙流体的体弛豫时间 T_{2b} 较大,同时对于低磁场核磁共振岩样实验,仪器施加的磁场为均匀磁场,扩散弛豫速率 $1/T_{2D}$ 基本为零^[5]。多孔介质一般均具有很大的比表面特征,岩石孔隙表面与孔隙流体之间具有较强的相互作用,含氢流体(如水、煤油等)等的表面弛豫时间 T_{2s} 远小于其自由状态的体弛豫时间 T_{2b} 。因此,当不考虑体弛豫和扩散弛豫时,

式(1)可以简化为

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \quad (2)$$

式中, ρ 为岩石横向表面弛豫强度系数, $\mu\text{m}/\text{ms}$; S 为岩石孔隙总表面积, μm^2 ; V 为孔隙体积, μm^3 。

从式(2)可以看出,岩石比表面越大,则其 T_2 弛豫时间越小,岩石比表面越小,则其 T_2 弛豫时间越大。饱和水岩石核磁共振 T_2 谱本质上反映的是岩石孔隙流体与孔隙表面之间的相互作用强^[4-5]。

2 岩核磁共振响应特征

2.1 页岩核磁共振 T_2 谱特征

根据核磁共振弛豫机理,岩石饱和水状态的 T_2 谱在油层物理中的含义是指岩石孔隙大小分布特征^[4]。因此,根据饱和水状态岩石 T_2 谱响应特征就可以定性分析储层物性特征。储层物性越好,岩石中较大孔隙越发育,则 T_2 谱上弛豫时间较长的核磁信号所占比例越多,相反岩石中细微孔隙越发育,则 T_2 谱上弛豫时间较短的核磁信号所占比例越多^[4]。大量实验研究表明,饱和水状态砂岩 T_2 谱一般呈双峰态分布,裂缝和溶洞发育的碳酸盐岩和火山岩储层 T_2 谱一般呈三峰态分布, T_2 弛豫时间最长的右峰对应裂缝和溶洞中的流体核磁共振信号^[4]。探索研究页岩核磁共振 T_2 谱响应特征,不仅可以定性分析该类储层物性品质及比表面特征,而且对于地层核磁测井结果解释、岩性识别及裂缝、溶洞孔隙度计算也具有重要的指导作用^[4-5]。

实验共选取了12块致密页岩岩芯进行核磁共振实验,表1为12块岩芯常规物性参数测试结果。12块岩芯孔隙度平均值为3.10%,气测渗透率分布为 $(0.049-78.102) \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ (即 μD),平均值为 $7.280 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ 。实验采用的低磁场核磁共振岩样分析仪为中国石油勘探开发研究院廊坊分院研制的 RecCore04 型核磁共振仪,该仪器各项性能指标均达到国际先进水平。核磁共振实验中设置等待时间 T_w 为5000ms,回波间隔时间 T_E 为0.6ms,回波个数 N_E 为1024,扫描次数 SCAN 为128。

图1为12块页岩岩芯孔隙度与渗透率之间关系。可以看出,页岩孔隙度与渗透率之间的相关性较差,反映出实验研究的页岩储层部分孔隙对渗透率的贡献较小,岩石孔隙空间的增加并不一定能增加其渗流能力。如表1中孔隙度接近的 SH-7 和 SH-12 两块岩芯,后者的渗透率为前者的236.7倍。与常规砂岩储层以粒间孔隙、次生溶蚀孔为主的连通性较好的孔隙类型不同,页岩孔隙由有机物质内孔隙、化石孔隙、矿物内孔隙及微裂缝孔隙等组成,孔隙之间的连通性相对较差^[6-7],该类储层孔隙度与渗透率之间并不具有同比例增长关系。但对于裂缝、微裂缝发育储层,由于流体在裂缝中的渗流阻力较小,裂缝、微裂缝发育对储层渗透率的贡献很大,因此该类储层虽然孔隙度较小但却具有较高的渗透率。

图2为12块岩芯饱和水状态的核磁共振 T_2 谱。根据图

表 1 12 块页岩岩芯常规物性参数测试结果

Table 1 Petrophysical properties of 12 shale rock core samples

序号	岩芯编号	长度/cm	直径/cm	常规孔隙度/%	核磁孔隙度/%	气测渗透率/ $10^{-6}\mu\text{m}^2$	T_2 谱分类	T_2 截止值/ms
1	SH-1	3.06	2.52	3.41	3.19	0.049	1	—
2	SH-2	3.05	2.52	1.65	1.10	0.157	2	5.57
3	SH-3	3.08	2.52	1.63	1.26	0.163	3	—
4	SH-4	3.07	2.52	0.82	0.74	0.227	2	16.68
5	SH-5	3.24	2.51	5.59	4.95	0.280	2	4.64
6	SH-6	3.15	2.51	3.32	2.62	0.316	2	5.57
7	SH-7	2.95	2.52	1.49	1.23	0.330	3	9.64
8	SH-8	3.07	2.52	1.14	0.83	0.360	3	13.89
9	SH-9	3.10	2.52	5.18	4.30	0.942	1	6.69
10	SH-10	3.15	2.52	7.86	5.00	1.024	1	3.87
11	SH-11	3.08	2.54	3.51	2.60	5.411	2	8.03
12	SH-12	2.64	2.55	1.64	1.00	78.102	2	—

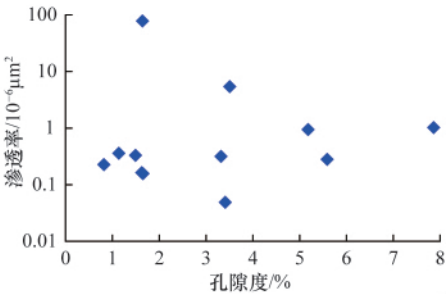


图 1 页岩储层孔隙度与渗透率的关系

Fig. 1 Relationship between porosity and permeability

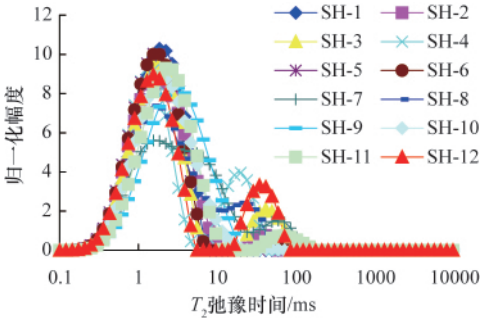


图 2 12 块页岩岩芯核磁共振 T_2 谱

Fig. 2 NMR T_2 spectrum of 12 shale reservoir core samples

2 中页岩 T_2 谱发育单峰、双峰特征及双峰是否连续分布等特征, 可以将实验研究的页岩岩芯核磁共振 T_2 谱分为 3 种类型, 如图 3 所示。图 4 为渗透率基本相同的致密砂岩气藏岩芯(气测渗透率为 $0.076\times10^{-3}\mu\text{m}^2$)与页岩岩芯(SH-12 岩芯)饱和水状态核磁共振 T_2 谱对比图。

从图 2 和图 3 可以看出, I 类页岩岩芯核磁 T_2 谱 (SH-1 岩芯) 呈明显的单峰态分布, T_2 谱峰值对应的弛豫时间约为 2ms, 最大 T_2 弛豫时间一般小于 10ms, 核磁共振 T_2 谱弛豫时

间几何平均值 T_{2g} 约为 2.85ms。该类岩石 T_2 谱以单峰峰值为中心具有较好的几何对称性, 实验研究的 12 块岩芯中有 3 块岩芯核磁 T_2 谱属于 I 类。

与 I 类核磁 T_2 谱呈单峰态不同, II 类核磁 T_2 谱 (SH-2 岩芯) 除具有几何对称的左峰外, 还具有一与左峰完全分开的右峰, 但其核磁信号幅度远小于左峰, 反映出该类储层中除发育有机质内孔、化石内孔等细微孔隙外, 还发育有数量相对较少的溶洞或裂缝、微裂缝等孔隙空间。II 类核磁 T_2 谱

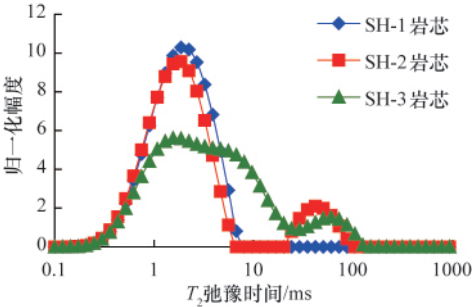


图 3 3 种不同类型核磁共振 T_2 谱

Fig. 3 Three different types of NMR T_2 spectra

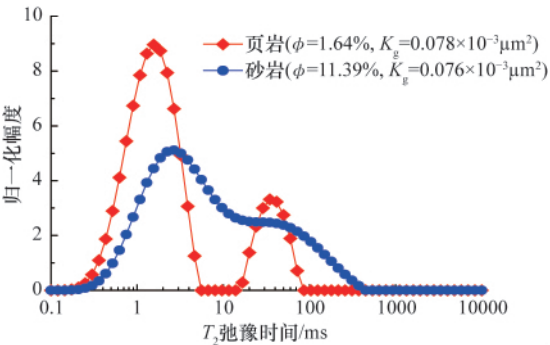


图 4 页岩与致密砂岩核磁 T_2 谱对比

Fig. 4 Comparison between shale and tight sandstone T_2 spectra

左峰弛豫时间与 I 类核磁 T_2 谱基本相同,其最大 T_2 弛豫时间仍小于 10ms。 T_2 谱右峰峰值对应的 T_2 弛豫时间约为 40ms,其最大 T_2 弛豫时间一般小于 100ms。

对属于 II 类的 7 块岩芯 T_2 谱计算表明, T_2 弛豫时间较长的右峰下包面积占 T_2 谱总下包面积的比例分布在 2.35%—22.99%,平均值为 9.16%。根据核磁共振原理,该数值实质上反映出裂缝发育页岩储层裂缝空间占储层总孔隙空间的比例。如表 1 中 SH-3 岩芯裂缝孔隙空间占岩石总孔隙空间的比例为 11.39%,裂缝孔隙体积约为 0.028cm³。图 5 即为该块岩芯在抽真空、加压饱和地层水后出现明显裂缝特征的数码照片,进一步证实了 T_2 谱中 T_2 弛豫时间较长的核磁信号对应储层中裂缝和微裂缝孔隙空间。



图 5 SH-3 页岩岩芯照片

Fig. 5 Photograph of SH-3 shale rock sample

图 2 中 III 类核磁 T_2 谱呈连续的双峰态分布, T_2 弛豫时间较小的左峰分布较宽且核磁信号幅度较大,左峰峰值对应的 T_2 弛豫时间约为 2ms,左峰最大 T_2 弛豫时间约为 25ms。 T_2 谱右峰峰值对应的 T_2 弛豫时间约为 60ms,最大 T_2 弛豫时间约为 120ms。该种类型核磁 T_2 谱反映出实验岩芯具有相对较宽的孔径分布,储层中不同大小孔隙均有发育,对应的储层渗透率也相对较大。

对比图 3 和图 4 可以看出,渗透率基本相同的砂岩与页岩岩芯核磁共振 T_2 谱具有较为明显的差异。与图 4 中渗透率基本相同的页岩岩芯相比,致密砂岩储层岩芯 T_2 谱呈连续的双峰态分布,左峰和右峰核磁信号分别对应细微孔隙和较大孔隙流体,这也是大多数低渗砂岩岩芯核磁共振 T_2 谱的典型特征。而图 4 中页岩 T_2 弛豫时间均小于砂岩 T_2 弛豫时间,页岩 T_2 弛豫时间小于 1ms 和 10ms 核磁信号所占幅度均明显大于砂岩。通过系统研究致密页岩核磁共振 T_2 谱响应特征,不仅可以定性了解和认识储层孔隙结构特征,而且对于核磁测井进行岩性识别、裂缝识别和孔隙度计算也具有重要的指导作用。

2.2 根据核磁 T_2 谱研究页岩比表面分布特征

根据式(2),饱和水岩石核磁共振 T_2 谱从物理机理上反映的是岩石孔隙中液固相互作用强弱,即多孔介质的比表面特征。岩石越致密,细微孔隙发育越多则其比表面越大,孔隙

流体 T_2 弛豫时间越小。因此,根据核磁共振实验测试的 T_2 谱分布就可以分析页岩储层的比表面特征,相对于其他实验测试方法而言,核磁共振测试结果具有更高的实验效率和更加明确的物理机理。

将式(2)变形写为反映比表面分布特征的形式:

$$\frac{S}{V} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{T_2} \quad (3)$$

式中, S/V 为岩石的比表面, μm^{-1} ; ρ 为岩石表面弛豫强度系数, $\mu\text{m}/\text{ms}$ 。

根据 Sondergeld 等^[7]的研究结果,页岩表面横向弛豫强度系数 ρ 平均约为 0.05 $\mu\text{m}/\text{ms}$ 。因此,根据式(3)计算得到表 1 中 SH-12 岩芯比表面分布特征,如图 6 所示。可以看出,致密页岩比表面主要分布在 3.59—80.51 μm^{-1} ,平均值约为 14.34 μm^{-1} 。

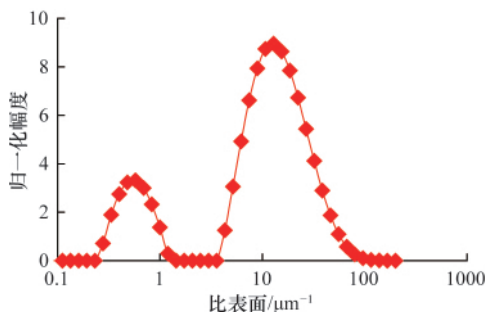


图 6 SH-12 岩芯比表面分布特征

Fig. 6 Photograph of SH-12 shale rock sample

2.3 页岩岩芯核磁孔隙度实验结果

图 7 为 12 块页岩岩芯常规水测孔隙度与核磁孔隙度对比图。从图 7 和表 1 可以看出,页岩核磁孔隙度普遍小于水测孔隙度,12 块岩芯水测孔隙度平均值为 3.10%,而核磁孔隙度平均值为 2.40%,以水测孔隙度为基准计算的两种孔隙度之间的平均误差约为 22.33%。同时从图 7 还可以看出,实验研究的部分页岩岩芯水测孔隙度越大,则两种孔隙度之间的误差越大。

根据核磁孔隙度计算原理,饱和在岩石中的含氢流体其

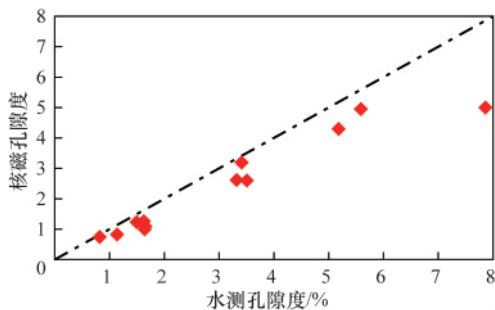


图 7 水测孔隙度与核磁孔隙度的关系

Fig. 7 Relationship between conventional and NMR porosity

核磁弛豫信号只要能被检测到且经过精确的刻度,则核磁共振仪器就可以给出与水测孔隙度基本相同的核磁孔隙度。相关学者对大量沉积砂岩和碳酸盐岩进行的实验研究均表明核孔隙度具有较高的精确性,其与水测孔隙度之间的误差一般小于 1%^[4-5,8]。除了部分特殊岩性储层含有锰、铁等顺磁性物质对核磁信号具有较为明显的影响外,导致岩芯核磁孔隙度偏小的主要原因即在于核磁共振技术本身的局限性和岩石中黏土孔隙等极细微孔隙或溶洞、裂缝等超大孔隙的发育^[9]。岩芯核磁测试时仪器设定的回波间隔时间 T_E 具有一定的限制,则富含黏土的页岩中部分黏土束缚水 T_2 弛豫时间很小,在核磁仪器脉冲发射与接受的反应时间内该部分流体核磁信号已基本衰减结束,因此无法检测到完整的黏土束缚水信号,将导致核磁孔隙度小于水测孔隙度^[4-5]。同时,对于发育有裂缝、微裂缝及孔径相对较大的溶洞的页岩,其中所含流体具有较长的 T_2 弛豫时间,即使将核磁测试时的仪器等待时间 T_w 设置为 9000ms 也很难完整检测到较大孔隙中含氢流体的弛豫信号^[5],这即是图 6 中部分孔隙度较大岩芯核磁孔隙度误差较大的主要原因。

2.4 页岩储层可动流体 T_2 截止值标定

可动流体 T_2 截止值 $T_{2cutoff}$ 是室内核磁共振岩样分析、核磁录井及测井进行储层可动流体百分数、束缚水饱和度等参数计算所需的关键参数之一,是岩石饱和水状态 T_2 谱上束缚水与可动流体 T_2 弛豫时间的分界线^[5]。国内外学者对于砂岩和碳酸盐岩储层 $T_{2cutoff}$ 进行了大量实验研究^[4-5],Schlumberger 公司对于中、高渗砂岩储层推荐 $T_{2cutoff}=33ms$,对于碳酸盐岩储层推荐 $T_{2cutoff}=92ms$,国内王为民等对低渗砂岩储层研究表明其 $T_{2cutoff}$ 分布范围很宽,平均值为 12.85ms^[4],仅约为中、高砂岩储层 $T_{2cutoff}$ 的 1/3。获得准确的储层 $T_{2cutoff}$ 对于核磁共振技术在页岩气藏开发中的应用具有重要的指导作用。

为了确定页岩储层的 $T_{2cutoff}$ 值,选取表 1 中 12 块岩芯中外形规则的 9 块进行高速气水离心实验,在岩芯气水离心前后均进行核磁共振测试。图 8 为表 1 中 SH-6 岩芯离心前后核磁共振 T_2 谱。从图 8 可以看出,页岩岩芯气水离心后仅将较大孔隙及裂缝中的流体离心出来, T_2 弛豫时间小于 10ms 的细微孔隙中的流体基本未被离心出来,表现为核磁共振 T_2 谱左峰基本未发生变化,而幅度较小的右峰基本全部消失。继续增大离心力,岩芯核磁共振 T_2 谱上 T_2 弛豫时间小于 10ms 的细微孔隙中的流体仍然未被离心出来,岩芯含水饱和度的减小主要仍然来自于弛豫时间较大的孔隙和裂缝,但其减小幅度很小,如图 9 所示(SH-10 岩芯)。

根据气水离心实验结果可知,实验研究的页岩储层中处于自由状态的游离气主要分布在孔径大于 $1\mu m$ (对应 T_2 弛豫时间约为 10ms) 的裂缝及孔径分布在 $0.1-1\mu m$ 的孔隙空间中,孔径小于 $0.1\mu m$ 的孔隙空间主要为吸附气。对气水离心的 9 块岩芯实验结果统计表明,9 块岩芯束缚水饱和度分布在 80.26%—97.18%,平均值为 90.28%,即 9 块致密页岩游离

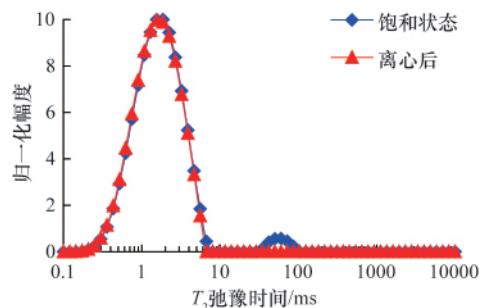


图 8 SH-6 岩芯离心前后核磁共振 T_2 谱

Fig. 8 NMR T_2 spectra operation of SH-6 before and after centrifugal

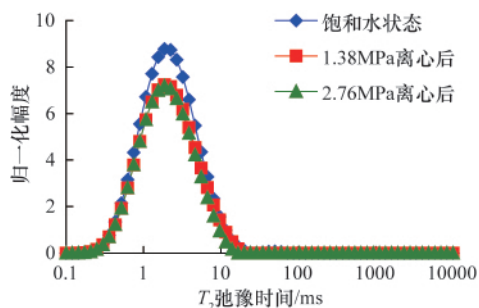


图 9 SH-8 岩芯离心前后核磁共振 T_2 谱

Fig. 9 NMR T_2 spectra operation of SH-8 before and after centrifugal

气饱和度平均值约为 9.72%,该离心实验结果仅对应页岩气储层基质游离气饱和度,由于实际具有开发潜力的页岩气储层往往发育一定的裂缝和微裂缝,因此,实际气藏游离气饱和度一般大于室内岩心离心实验结果^[1-2]。9 块岩芯可动流体 T_2 截止值分布在 3.87—16.68ms,平均值为 8.29ms。页岩储层可动流体 T_2 截止值仅为中、高渗砂岩储层可动流体 T_2 截止值的 1/4,仅约为碳酸盐岩储层可动流体 T_2 截止值的 1/10。

3 结论

本文使用低磁场核磁共振岩样分析仪,系统研究了页岩核磁共振 T_2 谱响应特征、页岩核磁孔隙度与常规孔隙度的差异,结合离心实验结果标定了页岩可动流体 T_2 截止值及基质储层游离气饱和度。主要实验结果如下。

(1) 实验研究的页岩孔隙度分布在 0.82%—7.86%,平均值为 3.10%,渗透率分布在 $(0.049-78.102)\times 10^{-6}\mu m^2$,平均值为 $7.280\times 10^{-6}\mu m^2$,孔隙度与渗透率之间的相关性较差。

(2) 页岩核磁共振 T_2 谱可分为 3 种类型:弛豫时间均小于 10ms 的单峰态 T_2 谱(I类)、含有孤立右峰的双峰态 T_2 谱(II类)及左、右峰连续分布的双峰态分布 T_2 谱(III类);页岩 T_2 谱上绝大多数 T_2 弛豫时间小于 10ms,相同渗透率的页岩 T_2 谱分布范围较砂岩窄,且右峰核磁信号幅度远小于左峰。

(3) 根据页岩核磁共振 T_2 谱,计算得到页岩比表面主要

分布在 $3.59\text{--}80.51\mu\text{m}^{-1}$, 平均值约为 $14.34\mu\text{m}^{-1}$ 。

(4) 页岩核磁孔隙度普遍小于水测孔隙度, 两种孔隙度之间的相对误差平均约为 22.33%, 页岩中致密细微孔隙及部分裂缝、溶洞等较大孔隙的发育是导致核磁孔隙度偏小的主要原因。

(5) 核磁共振与离心实验结果表明, 页岩气水离心过程中仅有较大孔隙 ($T_2>10\text{ms}$) 中的水被离心出来, 继续增大离心力细微孔隙中的水仍未被离心出来; 页岩储层可动流体 T_2 截止值分布在 $3.87\text{--}16.68\text{ms}$, 平均值为 8.29ms , 离心实验给出的页岩储层基质游离气饱和度平均值约为 9.72%。

参考文献 (References)

- [1] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 597–603.
Zhang Xuefen, Lu Xiancai, Zhang Linye, et al. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(6): 597–603.
- [2] 徐建永, 武爱俊. 页岩气发展现状 & 勘探前景 [J]. 特种油气藏, 2010, 17(5): 1–7.
Xu Jianyong, Wu Aijun. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2010, 17(5): 1–7.
- [3] 熊伟, 郭为, 刘洪林, 等. 页岩的储层特征以及等温吸附特征 [J]. 天然

气工业, 2012, 32(1): 113–116.

Xiong Wei, Guo Wei, Liu Honglin, et al. *Natural Gas Industry*, 2012, 32 (1): 113–116.

- [4] 王为民, 叶朝辉, 郭和坤. 录像储层岩石核磁共振物理特征的实验研究[J]. 波谱学杂志, 2001, 18(2): 113–121.

Wang Weimin, Ye Chaohui, Guo Hukun. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2001, 18(2): 113–121.

- [5] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

Xiao Lizhi. *NMR Imaging logging and rock NMR properties and its applications*[M]. Beijing: Science Press, 1998.

- [6] Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S, et al. Micro-structural studies of gas shales [C]//SPE131771, Proceedings of SPE Unconventional Gas Conference, Allen, TX: Society of Petroleum Engineers, 2010, doi: 10.2118/131771-MS.

- [7] Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky T E, et al. Petrophysical consideration in evaluating and producing shale gas resources [C]// SPE131768, Proceedings of SPE Unconventional Gas Conference, Allen, TX: Society of Petroleum Engineers, 2010, doi: 10.2118/131768-MS.

- [8] 肖立志. 我国核磁共振测井应用中的若干重要问题 [J]. 测井技术, 2007, 31(5): 401–407.

Xiao Lizhi. *Well Logging Technology*, 2007, 31(5): 401–407.

(责任编辑 胡少卿, 朱宇)

· 学术动态 ·

“2012 年中医外科学学术年会”征文通知



由中华中医药学会主办承办的“2012 年中医外科学学术年会”定于 2012 年 10 月 25–28 日在南通市召开。

征文内容: (1) 中医治疗外科各种疾病(包括疮疡、乳房、瘰、瘿、岩、皮肤、肛肠、男性前阴病、周围血管疾病、外伤性疾病、急腹症、疝、泌尿生殖和性传播疾病、蛇伤、普外、美容等)临床经验以及临床诊疗心得; 外科疾病病因学研究、辨证论治规律及中药作用机理的研究; (2) 转化医学与中医外科学: 中医外科研究的发展方向、思路、方法及切入点探讨; (3) 名老中医、民间及特色疗法等经验、创新总结以及中医外科理论与文献研究; (4) 中医外科常见疾病的诊断、治疗和操作规范及标准化研究; (5) 外科疾病的中医临床护理; (6) 中医外科学学科建设、专科建设经验总结等。除上述内容外, 凡有关中医外科临床经验总结、实验研究、理论探讨、新药物、新技术及新进展、中医外科临床教学、研究生培养体会、教学方法以及近 1–2 年已发表的优秀论文均欢迎投稿。(注: 副主任委员以上单位应不少于 3 篇; 论文稿件经审稿录用后将以会议专刊形式刊出。)

论文截稿日期: 2012 年 9 月 30 日

联系电话: 0513–85126355

电子信箱: tcmbdc@126.com

会议网站: http://www.cacm.org.cn/cobportal/portal/channel_tzgg.ptview?funcid=showContent&infoLinkId=30101&infoSortId=52281